



19 BUNDESREPUBLIK  
DEUTSCHLAND



DEUTSCHES  
PATENTAMT

12 Offenlegungsschrift  
10 DE 41 22 391 A 1

51 Int. Cl. 5:  
H 02 P 5/00  
H 02 P 6/00

21 Aktenzeichen: P 41 22 391.8  
22 Anmeldetag: 5. 7. 91  
43 Offenlegungstag: 7. 1. 93

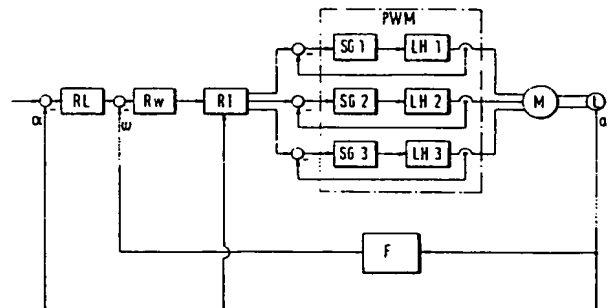
DE 41 22 391 A 1

71 Anmelder:  
Robert Bosch GmbH, 7000 Stuttgart, DE

72 Erfinder:  
Brunsbach, Bernd-Josef; Henneberger, Gerhard,  
Prof. Dr., 5100 Aachen, DE

54 Verfahren zum Betrieb eines drehzahlregelbaren Motors

57 Es wird ein Verfahren zum Betrieb eines drehzahlgeregelten elektrischen Motors vorgeschlagen, bei dem die Drehzahl ( $\omega$ ) aus dem mittels eines Lagegebers (L) gemessenen Lagewinkels ( $\alpha$ ) durch ein Filter bestimmt wird. Das Filter ist zweckmäßig ein Kalman-Filter, welches die Elemente eines Zustandsrektors schätzt, der vorzugsweise nur die Drehzahl ( $\omega$ ) sowie zwei weitere aus dem Lagewinkel ( $\alpha$ ) gebildete Größen umfaßt. Das Verfahren kommt ohne mechanischen Drehzahlsensor aus.



DE 41 22 391 A 1

## Stand der Technik

Die Erfindung geht aus von einem Verfahren nach der Gattung des Hauptanspruchs.

Gegenwärtige, unter Verwendung von mechanischen Sensoren aufgebaute Steuerungen für drehzahlregelbare Motoren aller Art weisen häufig eine Kaskadenstruktur auf, wobei dem Lageregelkreis der Drehzahlregelkreis sowie der Stromregelkreis unterlagert sind. Besonders große Anforderungen sind an den Drehzahlsensor und den zugehörigen Regelkreis gestellt. Infolge der konkurrierenden Anforderungen einer einerseits möglichst großen Auflösung und andererseits einer hohen Abtastfrequenz sind insbesondere die Drehzahlsensoren aufwendig und teuer.

Um den Drehzahlsensor einzusparen, ist es grundsätzlich bekannt, ein Kalman-Filter zur Schätzung der Drehzahl zu verwenden. Alle bekannten Vorschläge verwenden aber als Zustandsgrößen insbesondere elektrische Meßgrößen wie Motorstrom und Motorspannung. Aus der Schrift M. Schroedl, Control of a Permanent Magnet Synchronous Maschine using a new Position Estimator, ICEM 1990, ist ein System bekannt, das auf der Vereinfachung der Momentengleichung durch Annahme eines innerhalb eines Abtastschrittes konstanten Lastmoments beruht und als Ausgangsgröße den Rotorlagewinkel benutzt. Dieser Vorschlag führt auf ein relativ komplexes Modell und macht dadurch eine große Rechnerleistung erforderlich, sowie darüber hinaus zusätzliche Sensoren.

Aus der Schrift "Archiv für Elektrotechnik", 1990, Seite 325 bis 335 ist der Vorschlag bekannt, mit Hilfe eines Kalman-Filters einen Antrieb ohne mechanische Sensoren zur realisieren. Mittels des Filters werden allein aus den elektrischen Klemmengrößen Strom und Spannung alle übrigen Zustandsgrößen der Maschine geschätzt. Zur Motorregelung werden weder ein Lagesensor noch ein Drehzahlsensor benötigt. Die Schrift legt dar, daß ein Betrieb eines asynchronen Motors unter Zuhilfenahme eines Kalman-Filters möglich ist. Nachteilig an dem in dieser bekannten Schrift beschriebenen Verfahren ist, daß die erzielte Schätzgenauigkeit der Drehzahl noch unbefriedigend ist. Entweder ist deshalb für hochgenaue Anwendungen die Installation eines sehr leistungsfähigen und dadurch sehr teuren Rechners erforderlich oder aber es müssen erhebliche Abstriche bei der erzielbaren Genauigkeit, etwa infolge eines vereinfachten Maschinenmodellansatzes oder einer zu großen Abtastzeit in Kauf genommen werden. Insgesamt ist das in der Schrift vorgeschlagene Verfahren mit den gegenwärtigen technischen Möglichkeiten noch zu aufwendig.

Ziel der vorliegenden Erfindung ist es, ein Regelverfahren anzugeben, welches insbesondere auch bei kleinen Drehzahlen eine hohe Genauigkeit garantiert.

Die Aufgabe wird gelöst mit einem Verfahren mit den Merkmalen des Hauptanspruchs. Das erfindungsgemäße Verfahren macht einen mechanischen Drehzahlsensor überflüssig. Dennoch wird auch bei kleinen Drehzahlen die Drehzahl präzise ermittelt. Ein weiterer Vorteil des erfindungsgemäßen Verfahrens ist, daß hinsichtlich des Rechners nur geringe Anforderungen gestellt sind. Die erforderliche Rechenleistung kann mit zur Zeit erhältlichen PC's erzielt werden. Von Vorteil ist desweiteren, daß der benötigte Lagegeber nur eine relativ geringe Genauigkeit aufweisen muß. Das erfindungsgemäße Verfahren gestattet die Gewinnung eines Drehzahlsignals aus einem relativ ungenauen Lagesignal. Zusätzlich zum Drehzahlwert liefert das erfindungsgemäße Verfahren noch einen aktuellen sowie einen voraussagenden Lageschätzwert.

Ein Ausführungsbeispiel des erfindungsgemäßen Verfahrens ist in der Zeichnung dargestellt und nachfolgend näher beschrieben.

## Zeichnung

Es zeigen

Fig. 1 ein Blockschaubild der Struktur eines mit Hilfe des erfindungsgemäßen Verfahrens betriebenen Motors, Fig. 2 ein Strukturbild des zugehörigen Signalprozesses.

## Beschreibung des Ausführungsbeispiels

Die Struktur eines nach dem erfindungsgemäßen Verfahren betriebenen elektrischen Motors ist in Fig. 1 dargestellt. Die Regelung des Motors M erfolgt in Form einer Kaskadenregelung, wobei einem Lageregler RL ein Drehzahlregler RW sowie ein Stromregler RI beispielhaft untergeordnet sind. Über den Umrichter PWM erfolgt die eigentliche Motoransteuerung. Der Umrichter PWM verfügt zu diesem Zweck für jeden Strang über einen Leistungshalbleiterblock LH1 – LH3 sowie eine zugehörige Steueranordnung SG1 – SG3. Auf der Motorwelle ist an einer geeigneten Stelle, zum Beispiel zwischen Motor und Last zur Erfassung der Winkellage ein handelsüblicher Absolut- oder Inkrementalgeber L angeordnet. Das von dem Lagegeber L abgegebene diskrete oder nicht diskrete Lagesignal wird dem Lageregler RL im Lageregelkreis zurückgeführt.

Des weiteren wird das Lagesignal über eine Verzweigung einem Filter F zugeführt, das zur Bestimmung der Drehzahl dient. Das Filter F leitet aus dem Lagesignal die Drehzahl  $\omega$  ab, die anschließend in den Drehzahlregelkreis zurückgeführt wird. Die Motorregelung mittels eines Kaskadenregelkreises ist, da sie weit verbreitet ist, stellvertretend genannt. Das Verfahren ist aber auch bei jeder anderem Regelkreisstruktur anwendbar.

Der Lagegeber L ist zum Beispiel ein herkömmlicher Inkrementalgeber mit 1024 Teilungen. Je nach Anforderungen können auch wesentlich genauere Geber eingesetzt werden. Allen Lagegebern gemeinsam ist, daß die abgegebenen Lagesignale fehlerbehaftet sind. Bezüglich der Verteilung der Fehler um den wahren Lagewert kann vorausgesetzt werden, daß diese gaußförmig oder zumindest gleichverteilt sind, so daß eine Gaußkurve

jedenfalls eine gute Näherung darstellt. Aus dem Lagesignal läßt sich grundsätzlich durch Differentiation nach der Zeit bereits in einfacher Weise die Drehzahl bestimmen. In der Regel erfolgt dabei eine Annäherung der exakten Differentiation durch einen Differenzenquotienten  $\omega_k = (\alpha_{k+1} - \alpha_k)/T$ . Darin sind  $\alpha_k, \alpha_{k+1}$  zwei in aufeinanderfolgenden Abtastschritten bestimmte Rotorlagen,  $T$  die Abtastzeit. Diese Art der Berechnung führt aber zu einem Fehler, der abhängig ist von der aktuellen Drehzahl. Während die Bestimmung der Drehzahl aus dem Lagewinkel bei großen Drehzahlen unproblematisch ist, führt bei kleinen Drehzahlen schon eine geringe Fehlerhaftigkeit des Lagewertes zu erheblichen Schwankungen der daraus abgeleiteten Drehzahl. Die Methode des Differenzenquotienten ist deshalb für hochgenaue Anwendungen insbesondere bei kleinen Drehzahlen ungeeignet.

Um ohne Einsatz eines mechanischen Drehzahlsensors trotzdem einen genauen Drehzahlwert zu erhalten, wird deshalb erfindungsgemäß vorgeschlagen, ein Kalman-Filter zur Berechnung der Drehzahl einzusetzen.

Der Kalman-Filter-Algorithmus beruht auf einem Prozeßmodell im zeitdiskreten Zustandsraum. Die Formulierung ist allgemein und nicht vom spezifischen Prozeßmodell abhängig. Ein wesentlicher Vorteil des Kalman-Filter-Algorithmus ist, daß Modellfehler und Meßfehler des betrachteten Prozesses in gewissen Grenzen zugelassen werden kann. Das Prinzip des Kalman-Filter-Algorithmus besteht darin, eine Filterung für den aktuellen Wert des Zustandsvektors und eine Prädikation für den nächsten Abtastzeitpunkt zu machen. Die Güte der Vorhersage, und damit die Genauigkeit des Modells wird im folgenden Abtastschritt durch die Abbildung des Zustandsvektors auf den Ausgangsvektor bewertet. Die zugrundeliegende Theorie sowie der prinzipielle Aufbau eines Kalman-Filters sind an sich bekannt. Auf eine weitergehende allgemeine Darstellung des Kalman-Filters wird deshalb verzichtet. Umfassende Darstellungen finden sich zum Beispiel in K. Brammer, Kalman-Bucy-Filter, Oldenburg-Verlag 1975, R. Isermann, Digitale Regelsysteme Band II, Springer Verlag 1987.

Die Hauptschwierigkeit bei der Realisierung eines Kalman-Filters liegt darin, ein geeignetes Modell für den beobachteten Prozeß anzugeben. Im folgenden wird dargestellt, wie ein erfindungsgemäßes Modell gewonnen wird.

**Bild 2** zeigt ein Prozeßmodell des Lagegebersystems. Es bezeichnen:  $H$  die Eingangsmatrix für das System-Rauschen,  $B$  die Eingangsmatrix für den Eingangsvektor,  $z^{-1}$  ein Verzögerungsglied,  $C$  die Ausgangsmatrix,  $A$  die Prozeßmatrix,  $Y_k$  den Ausgangsvektor,  $V_k$  das rectorielle Meßrauschen,  $W_k$  das Meßrauschen,  $U_k$  den Eingangsvektor.

Die Matrizen  $N$  und  $B$  sind durch das betrachtete System vorgegeben. Die Matrix  $N$  berücksichtigt den Prozeßmodellfehler in Form eines vektoriellen Systemrauschens, durch das vektorielle Meßrauschen  $V_k$  sind die Meßfehler des Lagegebers berücksichtigt. Es ist eine Eigenschaft des Kalman-Algorithmus, daß beide Rauschprozesse an sich nicht bekannt sein müssen. Es ist nur erforderlich, das statistische Verhalten der Rauschprozesse zu kennen. Beim betrachteten Lagegebersystem ist das statische Verhalten beider Rauschprozesse bekannt. Es kann angenommen werden, daß sie gaußförmig sind oder zumindest gut durch eine Gaußkurve angenähert werden können. Die Matrix  $N$  kann dadurch in einfacher Weise als Einheitsmatrix bestimmt werden. Da im vorliegenden Fall das System selbst durch das Kalman-Filter nicht beeinflußt werden soll, hat ferner die Eingangsmatrix  $B$  den Wert Null.

Zu bestimmen ist schließlich eine Systemmatrix  $A$ , welche einerseits die Bestimmung eines möglichst genauen Drehzahlwertes gestattet und andererseits in Echtzeit berechnet werden kann. Sie wird in folgender Weise gewonnen.

Einzig für den Filteralgorithmus verwendete reale Zustandsgröße ist das Lagesignal  $\alpha$  des Lagegebers. Um eine weitere Zustandsgröße zu gewinnen, werden zu dem Lagesignal die zugehörigen Werte  $\sin \alpha$  und  $\cos \alpha$  gebildet. Die durch diese trigonometrischen Umformungen erhaltenen Werte bilden die Elemente  $x_1$  und  $x_2$  eines zweidimensionalen Zustands-Vektors im zeitkontinuierlichen Zustandsraum. Es resultiert bei Beachtung, daß gilt (Winkelgeschwindigkeit = Zeitableitung des Lagewinkels), das einfache Modell in Matrizendarstellung:

$$\begin{pmatrix} \frac{dx_1}{dt} \\ \frac{dx_2}{dt} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 & \omega \\ -\omega & 0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x_1 \\ x_2 \end{pmatrix}$$

$$\begin{pmatrix} y_1 \\ y_2 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x_1 \\ x_2 \end{pmatrix}$$

Damit das Filter zur Drehzahlschätzung möglichst wenig Rechenzeit beansprucht wird im weiteren vorausgesetzt, daß die Winkelgeschwindigkeit  $\omega$  innerhalb eines Abtastschrittes konstant bleibt. Unter der Annahme, daß  $\omega$  als konstanter Parameter aufgefaßt werden kann, läßt sich ein äquivalentes zeitdiskretes System berechnen:

$$\begin{pmatrix} x_1 \\ x_2 \end{pmatrix}_{k+1} = \begin{pmatrix} \cos(\omega \cdot T) & \sin(\omega \cdot T) \\ -\sin(\omega \cdot T) & \cos(\omega \cdot T) \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x_1 \\ x_2 \end{pmatrix}_k$$

$$\begin{pmatrix} y_1 \\ y_2 \end{pmatrix}_k = \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x_1 \\ x_2 \end{pmatrix}_k$$

Zur Vervollständigung des Zustandsvektors ist noch ein Ansatz für die Winkelgeschwindigkeit  $\omega$  erforderlich. Hier hat es sich ebenfalls als ausreichend erwiesen, davon auszugehen, daß die Winkelgeschwindigkeit  $\omega$  innerhalb eines Abtastschrittes konstant bleibt. Das vollständige Modell im zeitdiskreten Zustandsraum lautet damit:

$$\begin{pmatrix} x_1 \\ x_2 \\ \omega \end{pmatrix}_{k+1} = \begin{pmatrix} \cos(\omega \cdot T) & \sin(\omega \cdot T) & 0 \\ -\sin(\omega \cdot T) & \cos(\omega \cdot T) & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x_1 \\ x_2 \\ \omega \end{pmatrix}_k$$

$$\begin{pmatrix} y_1 \\ y_2 \end{pmatrix}_k = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x_1 \\ x_2 \\ \omega \end{pmatrix}_k$$

Die erfindungsgemäße Bildung des Zustandsvektors aus den Elementen  $\cos \alpha$  und  $\sin \alpha$  hat den Vorteil, daß die Ausgangsmatrix  $C$  eine Einheitsmatrix wird. Dies vereinfacht wiederum die Berechnung und verkürzt die Rechenzeit.

Eine detaillierte hardwaremäßige Realisierung des erfindungsgemäßen Kalman-Filters muß hier nicht beschrieben werden, da sie ohne Mühe durch jeden Fachmann vorgenommen werden kann.

Das beschriebene Verfahren ist nicht eingeschränkt auf Motoren. Es eignet sich zur Schätzung der Geschwindigkeit eines Lagesignals bei allen Anordnungen, für die gilt: zeitliche Änderung der Lage = Drehzahl. Als Anwendungen kommen deshalb die meisten Anordnungen in Betracht, bei denen zeitlich oder räumlich äquidistante Lageinformationen vorliegen. Neben rotatorischen Bewegungen sind dies insbesondere translatorische Bewegungen.

#### Patentansprüche

1. Verfahren zum Betrieb eines drehzahlregelbaren elektrischen Motors, insbesondere eines bürstenlosen Servomotors, durch Regelung der Motorgrößen Strom, Lagewinkel und Drehzahl, **dadurch gekennzeichnet**, daß die Drehzahl ( $\omega$ ) aus den mittels eines Lagegebers ( $L$ ) gemessenen Lagewinkel ( $\alpha$ ) durch ein Filter ( $F$ ) bestimmt wird.
2. Verfahren nach Anspruch 1, dadurch gekennzeichnet, daß die Ermittlung der Drehzahl ( $\omega$ ) durch Schätzung mittels eines Kalman-Filters erfolgt.
3. Verfahren nach Anspruch 1 oder 2, dadurch gekennzeichnet, daß durch das Kalman-Filter Elemente des Zustandsvektors des Lagegebersystems geschätzt werden.
4. Verfahren nach einem der vorhergehenden Ansprüche, dadurch gekennzeichnet, daß der Zustandsvektor nur die Drehzahl ( $\omega$ ) sowie zwei weitere aus dem Lagewinkel ( $\alpha$ ) gebildete Größen umfaßt.
5. Verfahren nach einem der vorhergehenden Ansprüche, dadurch gekennzeichnet, daß zu jedem gemessenen Lagewinkel ( $\alpha$ ) die zugehörigen Werte für  $\sin \alpha$  und  $\cos \alpha$  berechnet werden und diese Werte zwei Elemente des Zustandsvektors bilden.
6. Verfahren nach einem der vorhergehenden Ansprüche, dadurch gekennzeichnet, daß die von dem Lagegeber gemessenen Lagewinkel ( $\alpha$ ) digitalisiert werden.

Hierzu 2 Seite(n) Zeichnungen

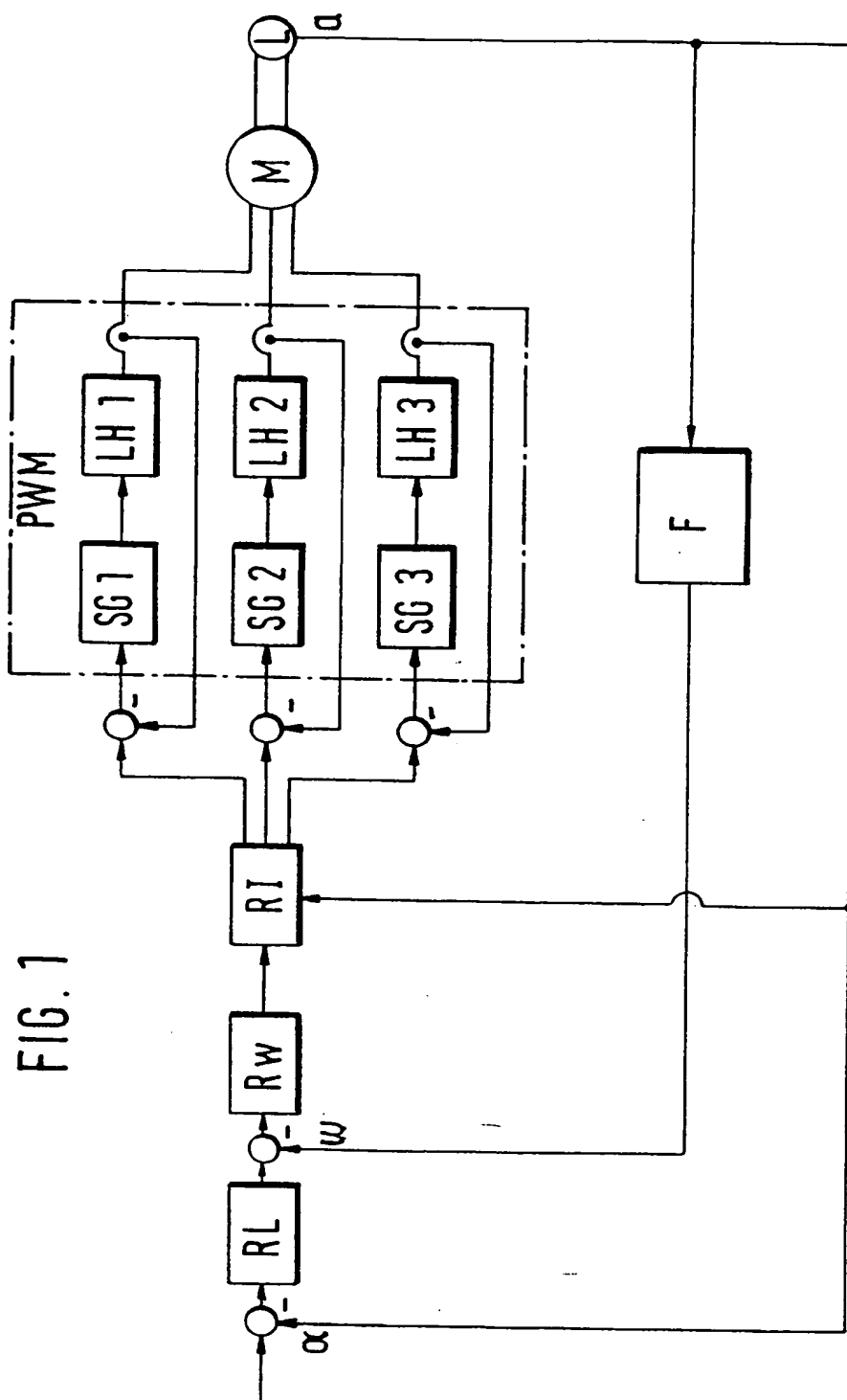


FIG. 2

